

Article, Published Version

Zweck, Heinz; Davidenkoff, Rostislav

Über die Zusammensetzung von Filtern

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103191>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zweck, Heinz; Davidenkoff, Rostislav (1956): Über die Zusammensetzung von Filtern. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 6. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 24-33.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Über die Zusammensetzung von Filtern.

Von Oberregierungsbaurat Dr.-Ing. Heinz Zweck und
Dr. Rostislav Davidenkoff

I. Einleitung.

Durch die Anordnung von Filtern in Bauwerken (z.B. Erddämmen, Grundwasserentnahmebrunnen, Ufermauern mit Entwässerungen) soll verhindert werden, dass eine Grundwasserströmung den anstehenden Boden auswäscht und damit eine Gefährdung der Standsicherheit des Bauwerkes herbeiführt.

Zur Erreichung einer zuverlässigen Wirkung des Filters müssen daher die folgenden zwei Forderungen erfüllt sein:

1. Das Wasser muss unbehindert das Filter durchfliessen können, und
2. die zu schützenden Bodenteilchen müssen durch das Filter gehalten sein.

Ein Filter ist daher aus Schichten verschiedener Korngrössen zusammengesetzt, wobei jede folgende durchlässiger als die vorherige ist.

Nach der in Deutschland üblichen Auffassung (Lit. 3 und 7) müssen die abgestuften Filter, auch Lagen- oder Stufenfilter genannt, so aufgebaut sein, dass die mittleren Korndurchmesser zweier benachbarter Schichten jeweils in einem Verhältnis von 3 bis 4,5 stehen.

Die Erfüllung der genannten Forderung gewährt in jedem Falle eine ausreichende Sicherheit. Berücksichtigt man aber die in der ausländischen Praxis verwendeten Regeln für den Filteraufbau und auch die Ergebnisse der bisher in der Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Erd- und Grundbau, durchgeführten Versuche, so können in den meisten Fällen ohne Nachteile gröbere Abstufungen im Filterbau gewählt werden; d.h. das Verhältnis der aneinandergrenzenden Korngrössen kann grösser sein als das obengenannte.

In dem vorliegenden Beitrag sollen zunächst die im In- und Ausland üblichen Auffassungen über den Filteraufbau genannt werden. Anschliessend werden verschiedene Faktoren, die einen Ein-

fluss auf den Filteraufbau haben, betrachtet und dann die bisherigen Versuche in der Bundesanstalt für Wasserbau geschildert und ihre Ergebnisse gebracht.

II. Bisherige Bemessungsverfahren.

Sichardt (Lit. 7) geht von der Vorstellung aus, dass 2 benachbarte Filterschichten aus Kugeln von jeweils gleichem Durchmesser bestehen, und stellt die Forderung auf, dass die Zwischenräume der Körner jeder Schicht kleiner als die Durchmesser des zurückzuhaltenden Materials sein müssen. Je nachdem die Lagerung der gröberen Schicht dicht oder locker ist, schwankt das Verhältnis des Durchmessers des gröberen zum feineren Material zwischen 2,42 und 6,46. Als Mittelwert wird 4,44 vorgeschlagen.

Versuche anderer Verfasser haben aber gezeigt, dass ein nach dieser Zahl bemessener Filteraufbau zu aufwendig ist und die Verhältniszahl in vielen Fällen vergrößert werden kann.

Das Bureau of Reclamation USA (Lit. 6) fordert je nachdem, ob ein gleich- oder ungleichförmiges Material vorliegt, die nachstehenden Verhältnisse der Korndurchmesser des gröberen (D) Filtermaterials zum feineren (d) Material (siehe Abb. 1 und 2):

Boden	1. Bedingung	2. Bedingung	Vergleiche
gleichförmiger	$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 5 \text{ bis } 10$		Abb. 1
ungleichförmiger	$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 12 \text{ bis } 58$	$\frac{D_{15}}{d_{15}} = 12 \text{ bis } 40$	Abb. 2

Abweichend hiervon schlägt das Corps of Engineers USA (Lit. 6) die folgenden drei Bedingungen vor:

1. Bedingung	2. Bedingung	3. Bedingung
$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$	$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 20$	$\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$

Terzaghi-Peck (Lit. 8) machen die folgenden Angaben, ohne die Gleich- oder Ungleichförmigkeit zu beschreiben (siehe Abb. 3):

1. Bedingung	2. Bedingung	Vergleiche
$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4$	$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4$	Abb. 3

Durch die erste Forderung ($D_{15}/d_{85} \leq 4$) soll erreicht werden, dass das feinere Material nicht in das gröbere eindringt, die zweite Forderung ($D_{15}/d_{15} \geq 4$) soll eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit des Filters gewährleisten.

Nimmt man sehr gleichförmige Böden mit einem Gleichförmigkeitsgrad d_{60}/d_{10} und $D_{60}/D_{10} = 2$ an, so entspricht die genannte Bedingung $D_{15}/d_{85} \leq 4$ ungefähr einem Verhältnis der mittleren Korngrößen D_{50}/d_{50} von etwa 10. Diese Verhältniszahl wird bei ungleichförmigen Böden sehr viel grösser.

In der französischen Literatur wird von Mayer (Lit. 5) für Brunnenfilter ein Verhältnis der groben zu den feinen Teilen von 6 bis 10 und von Mallet-Paquant (Lit. 4) für Filter in Erddämmen von $D_{15}/d_{15} = 9$ angegeben.

Bei diesen genannten Forderungen an den Filteraufbau ist mit Ausnahme der Brunnenfilter nicht angegeben, ob das Wasser von oben, von unten oder von der Seite in das Filter eintritt. Vermutlich ist hier der jeweils ungünstigste Fall angenommen, der, wie später angegeben wird, bei einer Strömung von oben nach unten auftritt.

Vergleicht man die obengenannten in der Praxis verwendeten Kornabstufungen, so sieht man, dass verschiedene Verfasser ein höheres Verhältnis der gröberen zu den feineren Korngrößen zulassen, als es durch die anfangs genannte Verhältniszahl von 3 bis 4,5 gegeben ist.

III. Wirkung des Filters.

Um die Wirkung eines Filters genau beurteilen zu können, müssen die im folgenden behandelten Faktoren berücksichtigt werden.

a) Berücksichtigung der Richtung der Wasserströmung in bezug auf die der Schwerkraft.

In der Abbildung 4 sind die drei wesentlichen Fälle der Richtung der Wasserströmung bei Eintritt in das Filter in bezug auf die Richtung der Schwerkraft dargestellt (Lit. 1). In der Skizze a fällt die Strömungsrichtung mit der der Schwerkraft zusammen, in der Skizze b ist sie rechtwinklig dazu und in Skizze c entgegengesetzt zur Schwerkraft gerichtet.

Im Falle a werden die Bodenteilchen, die durch das Filter gehalten werden sollen, nicht nur durch die Wasserströmung beansprucht sondern auch durch die Schwerkraft. Die feineren Bodenteilchen müssen also sowohl im trockenen Zustand wie auch bei Wasserströmung stabil bleiben.

Im Falle c muss dagegen die Schwerkraft erst überwunden werden, damit ein Ausspülen der feinen Teile erfolgen kann. Eine Störung des Gleichgewichts der feineren Teile kann erst erfolgen, wenn das Gewicht des Bodens durch den Strömungsdruck überwunden wird. Dies ist, wie aus der Berechnung des hydraulischen Grundbruchs bekannt ist, etwa bei einem Gefälle $i = 1$ möglich. Treten die so bewegten Teilchen (also bei einem Druckgefälle ≈ 1) in die gröbere Filterschicht, so werden sie hier zunächst nicht weiterbewegt, da das Druckgefälle hier wegen der grösseren Durchlässigkeit des Materials kleiner ist. Die Weiterbewegung kann erst bei einer beträchtlichen Steigerung des Gefälles erfolgen.

Bei Betrachtung des Falles b kann man sich vereinfachend vorstellen, dass das feine Material etwas in die Hohlräume des gröberen eintritt und sich hier unter Bildung von Böschungen ablagert. Durch den Strömungsdruck erhalten die Böschungen eine geringere Neigung als dies bei trockenem Material der Fall wäre. Die Böschungswinkel streben aber einem bestimmten Grenzwert zu (Lit. 2), Bei einem Gefälle von $i = \operatorname{tg} \varphi$ (φ = Reibungswinkel des feineren Materials) würde allerdings der Böschungswinkel gleich Null werden.

Aus der kurzen Behandlung dieser drei Fälle ergibt sich, dass der Fall a der ungünstigste und der Fall c der günstigste ist.

b) Berücksichtigung der Zusammensetzung des Filters.

Die Filter können grundsätzlich aus gleichförmigen oder ungleichförmigen Böden bestehen. Bei den vorgenannten Lagenfiltern (Stufenfilter) werden gleichförmige Böden, d.h. Böden mit nahezu gleichen Korngrössen, also mit steiler Kornverteilungskurve, gewählt, bei Mischfiltern ungleichförmige Böden, also Böden mit verschiedenen Korngrössen, d.h. mit flach verlaufender Kornverteilungskurve (Lit. 7). Die Erfahrungen, die zum Teil in Abschnitt II behandelt sind, zeigen, dass Filter aus ungleichförmigen Böden ein grösseres Verhältnis der groben zu den feinen Materialien als solche aus gleichförmigen Böden erlauben und infolgedessen auch wirtschaftlicher sind.

c) Berücksichtigung der absoluten Korngrössen des Bodens und des Filters und der Kohäsion des Bodens.

Bei den vorgenannten Empfehlungen über den Filteraufbau wurde das Verhältnis der Korngrössen des groben zu dem feinen Material ohne Rücksicht auf die absolute Korngrösse und eine etwaige Kohäsion angegeben.

Das betrachtete Verhältnis hängt aber, wie in bereits vorliegenden Versuchen ermittelt ist (siehe unten S.30), auch von der absoluten Korngrösse und, wie Davidenkoff (Lit.1) nachgewiesen hat, von der Kohäsion des Bodens ab. Die Kohäsion ermöglicht die Wahl eines viel grösseren Verhältnisses der Korngrössen des gröberen zu denen des feineren Materials als bei kohäsionslosen Böden. Der Filter kann infolgedessen sehr vereinfacht werden.

IV. Versuche.

Die bisherigen Versuche in der Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Erd- und Grundbau, sind für den ungünstigsten Fall einer Strömung, also von oben nach unten, bei kohäsionslosen Böden

durchgeführt worden. Hierbei wurden verschiedene Kornzusammensetzungen gewählt, die in der Tabelle mit den Versuchsergebnissen mit angegeben sind.

Zur Durchführung der Versuche dient ein Plexiglaszylinder mit einem Durchmesser von 14,7 cm und einer Länge von 23,5 cm, in den 2 Filterschichten bzw. eine Boden- und eine Filterschicht eingebaut sind. Die Abbildung 5 zeigt die Versuchseinrichtung. Zur Messung der Druckgefälle in den Bodenschichten und vor allem in der Übergangszone sind an der Seite 4 Piezometerröhren angebracht.

Bei den Versuchen wurde zunächst das kritische Verhältnis der feinen zu den groben Korngrößen für trockenes und unter Wasser eingebautes Material ermittelt, bei dem gerade noch die Stabilität des Filters vorhanden ist. Dann wurde unter dem Strömungsgefälle gleich oder etwas grösser als 1 die Stabilität des Filters bei diesem Verhältnis nachgeprüft. Bei den Versuchen mit trockenem und unter Wasser liegendem Material wurde beobachtet, ob feines Material in das gröbere hineinfällt. Bei den Versuchen mit vorhandener Wasserströmung wurde aus den dabei gemessenen Wassermengen und Druckdifferenzen zwischen den mittleren Piezometerröhren die Durchlässigkeit dieses Abschnittes errechnet. Es wurde festgestellt, ob der Wert mit der Zeit ab- oder zunahm. Eine Änderung der Durchlässigkeit lässt auf eine Veränderung der Kornzusammensetzung vor dem Filter durch Ausspülen des Bodens, d.h. auf eine ungenügende Wirkung des Filters, schliessen. Die Ergebnisse der Versuche sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

In dieser Tabelle ist unter stabilem Filteraufbau derjenige verstanden, bei welchem keine feinen Teile in das gröbere Filtermaterial eindringen, bzw. nur am Anfang eine geringe Kornbewegung stattfindet und das Filter dann stabil bleibt.

In den Versuchsreihen I und II (s. Tabelle) wurden Stufenfilter untersucht, wobei in der Reihe I die Kornzusammensetzung der gröberen Schicht, in der Reihe II die der feineren Schicht konstant gehalten wurde. In der Versuchsreihe III wurden Mischfilter untersucht.

Tabelle der Versuchsergebnisse

Nr.	D mm	d mm	$\frac{D_{50}}{d_{50}}$	Versuche mit trockenem Material	Versuche unter Wasser	Versuche unter Wasser mit Strömung
				ohne Strömung		
I ₁	6,0-10,0	0,1-0,2	53,4	unstabil	unstabil	unstabil
I ₂	6,0-10,0	0,2-0,5	22,9	unstabil	unstabil	unstabil
I ₃	6,0-10,0	0,5-1,0	10,7	stabil	unstabil	umstabil
I ₄	6,0-10,0	1,0-2,0	5,3	stabil	stabil	stabil
II ₁	3,0-6,0	0,1-0,2	30	unstabil	unstabil	unstabil
II ₂	2,0-3,0	0,1-0,2	16,7	stabil	stabil	stabil
II ₃	1,0-2,0	0,1-0,2	10	stabil	stabil	stabil
III ₁	2,0-10,0	0,1-0,5	25	stabil	stabil	stabil
III ₂	2,0-10,0	0,2-2,0	8,3	stabil	stabil	stabil

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Versuche können folgendermassen zusammengefasst werden:

1. Der Vergleich der Versuchsergebnisse in den Reihen I und II zeigt deutlich den Einfluss der Korngrösse auf das kritische Verhältnis D_{50}/d_{50} : Während bei dem gröberen Material dieses Verhältnis zwischen 5,3 und 10,7 liegt, steigt es bei dem feineren Material über 16,7 an. Vermutlich spielt bei der Korngrösse 0,1-0,2 mm (vgl. Versuch II₂) eine zwischen den Bodenteilchen wirkende, wenn auch sehr kleine Adhäsion eine merkbar günstige Rolle.
2. Der Vergleich der Versuchsergebnisse bei den Stufen- und Mischfiltern zeigt deutlich die schon bekannten Vorteile der letzteren. Während für die Stufenfilter der Reihe II das kritische Verhältnis D_{50}/d_{50} über 16,7 liegt, ist es bei den Mischfiltern der Reihe III grösser als 25.

Zusammenfassend kann auf Grund der vorliegenden Versuche bereits festgestellt werden, dass für den ungünstigsten Fall - Durchströmung von oben nach unten - und einem Filteraufbau aus gleichförmigem Material das kritische Verhältnis der Korndurchmesser zweier Filterschichten bei einem Ausgangsmaterial aus Mittel- und Grobsand bei 5 bis 10, aus Feinsand bei über rd. 15 liegt. Bei den untersuchten Filtern aus ungleichförmigem Material liegt dieser Wert bei gleicher Durchströmungsrichtung über 25. Somit sind zunächst die Empfehlungen vom Bureau of Reclamation, besonders was die Filter aus gleichförmigen Böden betrifft, bestätigt worden.

Durch weitere Versuche an Stufen- und Mischfiltern sollen die bisherigen Ergebnisse ergänzt werden, wobei auch andere Strömungsrichtungen als die obengenannte, ferner andere Ausgangskorngrößen und -Kornzusammensetzungen untersucht werden sollen.

VI. Literaturverzeichnis.

1. Davidenkoff: "De la composition des filtres dans les barrages en terre."
Cinquième Congrès des Grands Barrages
Paris 1955, Rapport 25.
2. Bernatzik: "Baugrund und Physik". 1947.
3. Lackner: "Technischer Jahresbericht über die Arbeiten des Ausschusses zur Vereinfachung der Berechnung und Gestaltung von Ufereinfassungen."
Die Bautechnik 32 (1955) H.12, S.417.
4. Mallet-Pacquant: "Les barrages en terre." 1951.
5. Mayer: "Les terrains perméables." 1954.
6. Post und Londe: "Les barrages en terre compactée." 1953.
7. Sichardt: "Kies und Sandfilter im Grund- und Wasserbau."
Die Bautechnik 29 (1952) H.3, S.72.
8. Terzaghi-Peck: "Soil Mechanics in Engineering Practice." 1948.

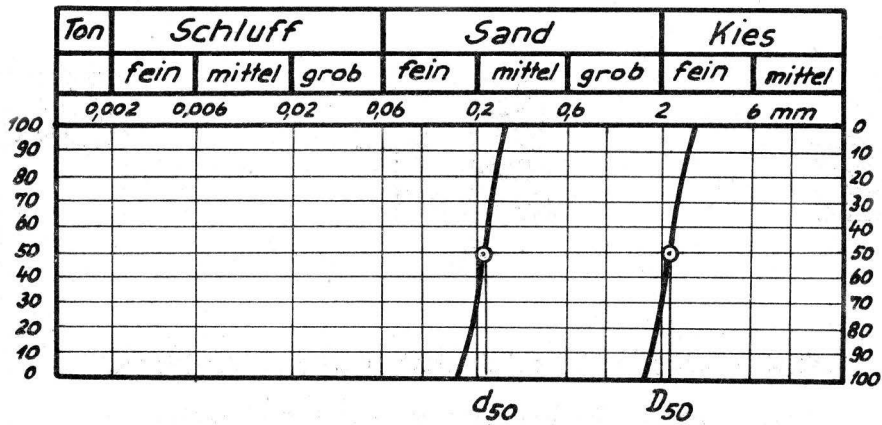


Abb. 1 Filter aus gleichförmigem Boden

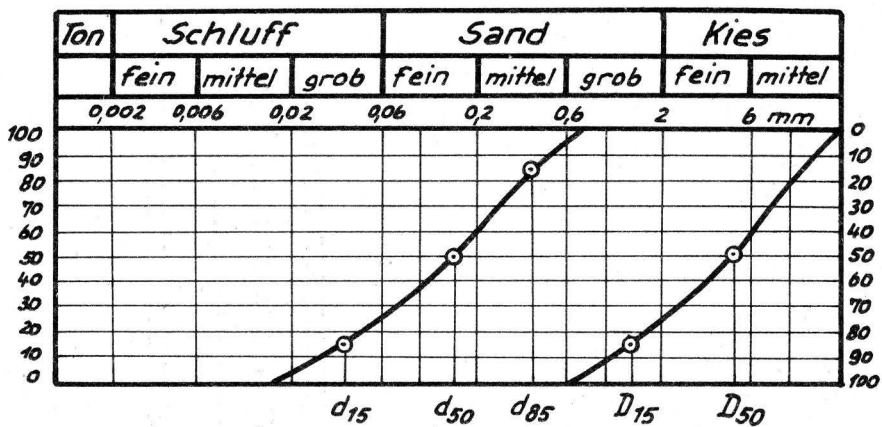
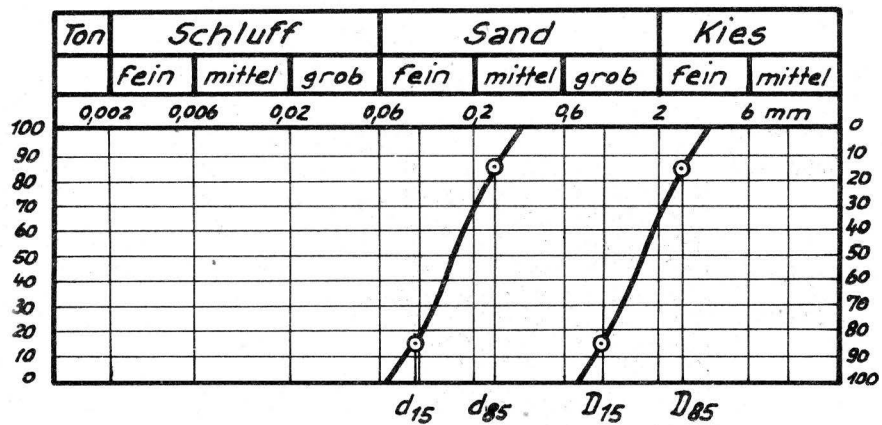


Abb. 2 Filter aus ungleichförmigem Boden



$$D_{15} \leq 4 d_{85}$$

$$D_{15} \geq 4 d_{15}$$

Abb. 3 Filteraufbau nach Terzaghi-Peck

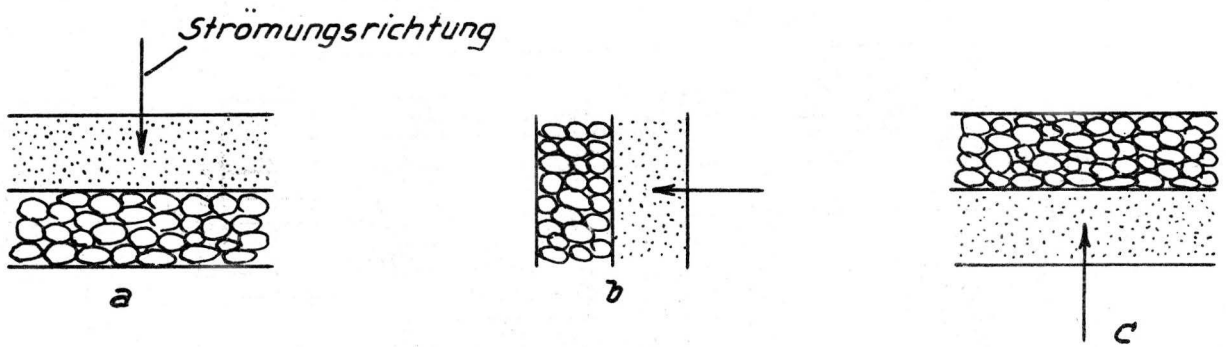


Abb. 4 *Lagen des Filters bei verschiedenen Strömungs - und Schwerkrafttrichtungen*

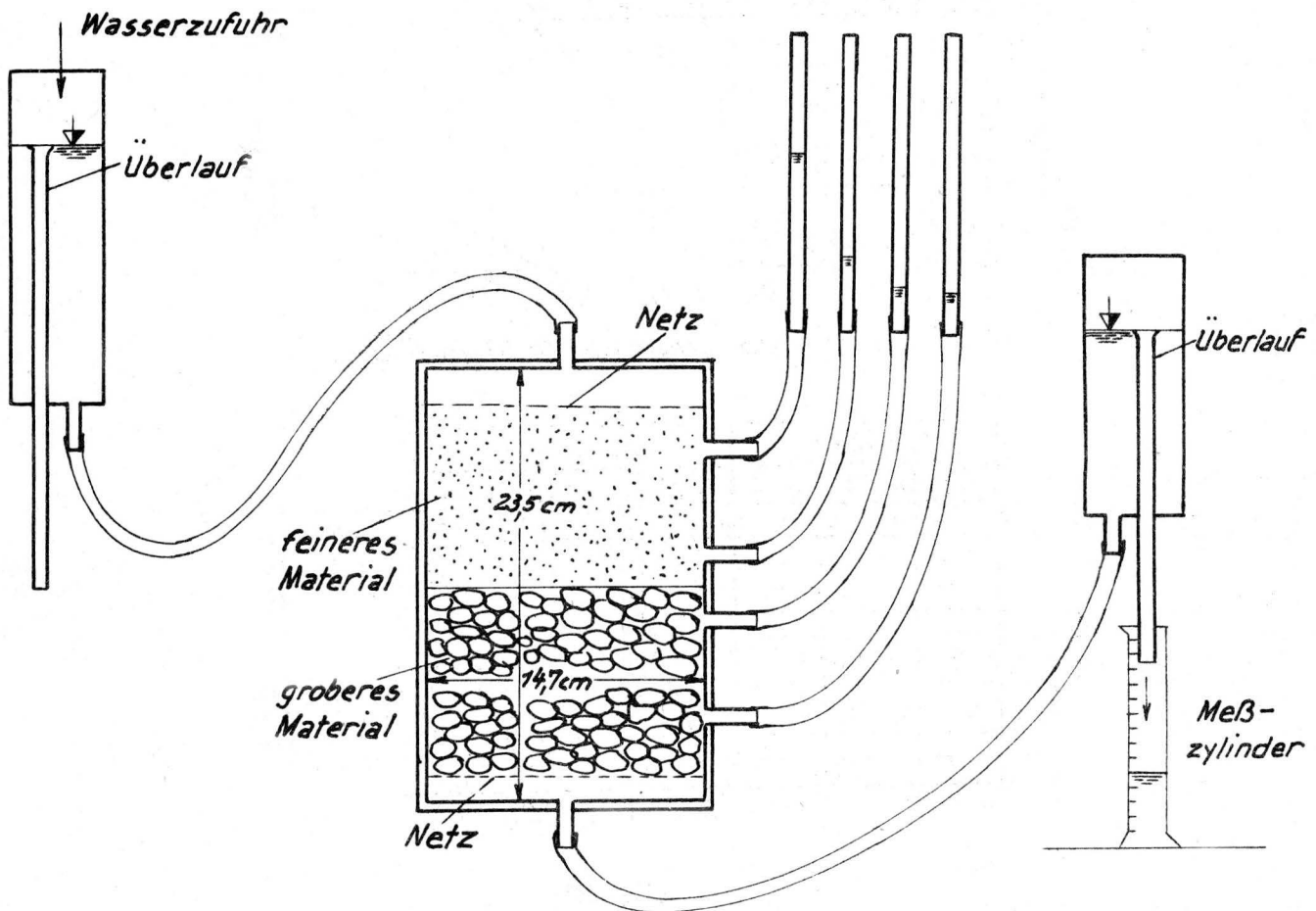


Abb. 5 *Gerät für die Filterversuche*